

Problem optymalnego zarządzania terenami zieleni miejskiej w Warszawie

Tomasz Żylicz
Zbigniew Szkop
Uniwersytet Warszawski

Abstrakt

Badanie analizuje problem optymalnego zarządzania terenami zieleni miejskiej w Warszawie z wykorzystaniem modelu przełożony-podwładny. Przełożonym w opisanym badaniu jest Prezydent Miasta st. Warszawy, natomiast podwładnym instytucja odpowiedzialna za wybór gatunków do nasadzeń drzew przyulicznych (ZOM). Przełożony jest zainteresowany zwiększeniem dobrobytu swoich wyborców, podczas gdy funkcjonariusze niższego rzędu nie biorą pod uwagę tych samych obaw – oni są zainteresowani maksymalizowaniem swojej korzyści pod pewnymi ograniczeniami nałożonymi przez swoich szefów. Jest to standardowy hierarchiczny model teorii agencji. Ponieważ kontrakt podwładnego nie jest poprawny motywacyjnie (kierownictwo ZOM nie jest rezydualnym (resztowym) pretendentem do zysków przełożonego), skład gatunkowy drzew przyulicznych w Warszawie nie maksymalizuje dobrobytu mieszkańców stolicy Polski - jest inny niż preferowany przez Prezydenta Miasta. Występuje nadreprezentacja drzew dużych, o dużym potencjalne do świadczenia usług ekosystemowych, ale mniejszym od niektórych innych gatunków rzeczywistym strumieniu świadczonych usług ekosystemowych.

Keywords: Principal-agent models, urban trees, ecosystem services

1. Wprowadzenie

Drzewa zmieniają warunki życia w mieście świadcząc szereg usług ekosystemowych. Szczególną rolę w tym zakresie pełnią drzewa przyuliczne, które wpływają nie tylko na jakość środowiska w tych najbardziej zanieczyszczonych miejscach, ale także przyczyniają się do redukcji spływu wód opadowych do kanalizacji miejskiej. Jak wykazano w niedawno wykonanym badaniu (Szkop, 2017¹) drzewa przyuliczne rosnące w Warszawie świadczą korzyści z tytułu pochłaniania wybranych zanieczyszczeń w wysokości około 600 tys. PLN rocznie. Ponadto ograniczają spływ wody opadowej do systemu kanalizacji miejskiej, co generuje korzyści w wymiarze niemal 400 tys. PLN rocznie. Badanie również pokazało, że dojrzałe drzewa dużych gatunków mogą świadczyć kilkakrotnie większy strumień korzyści od drzew mniejszych gatunków a strumień ten jest głównie uzależniony od powierzchni listowia drzew. W związku z coraz większą świadomością dotyczącą roli drzew w strukturach miejskich, powstaje pytanie: czy jest możliwe zwiększenie strumienia usług ekosystemowych świadczonych przez drzewa przyuliczne w Warszawie.

System zarządzania zielenią miejską w stolicy Polski ma charakter hierarchiczny, gdzie pozycję nadrzędną w imieniu Prezydenta Miasta ma Biuro Ochrony Środowiska Urzędu m.st. Warszawy (BOŚ).

Do zakresu działania Biura Ochrony Środowiska należy między innymi²:

- Prowadzenie spraw związanych z zarządzaniem środowiskiem m.st. Warszawy, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, poprzez opracowywanie i opiniowanie projektów planów i programów w zakresie ochrony środowiska;
- Prowadzenie spraw z zakresu ochrony przyrody, w tym związanych z utrzymaniem, ochroną i rozwojem terenów zieleni oraz nadzorem nad gospodarką drzewostanem w m.st. Warszawie;
- Inicjowanie tworzenia projektów regulacji prawnych i rozwiązań systemowych umożliwiających sprawne zarządzanie terenami zieleni, w tym opracowywanie wytycznych, programów, koncepcji modernizacji i rewaloryzacji terenów zieleni;

¹ Szkop, Z., 2017., *Wartość ekonomiczna usług ekosystemów świadczonych przez drzewa miejskie*. Working paper

² https://bip.warszawa.pl/Menu_podmiotowe/biura_urzedu/OS/default.htm. Dostęp sierpień 2017.

- Nadzorowanie i wspieranie działań prowadzonych przez jednostki organizacyjne m.st. Warszawy gromadzące, aktualizujące i opracowujące dane inwentaryzacyjne zieleni, w ramach ogólnomiejskiej bazy danych o terenach zieleni.

BOŚ stanowi zatem funkcję zarządczą, a nie podejmuje decyzji o nasadzeniach konkretnych gatunków. Jednostki podlegające pod BOŚ, podejmujące decyzje o nasadzeniach zależnie od lokalizacji to³:

- ZOM – zieleń przyuliczna przy ulicach zarządzanych przez ZDM⁴ (drogi krajowe, wojewódzkie i powiatowe) oraz niektóre parki;
- Wydziały Ochrony Środowiska poszczególnych dzielnic Warszawy – zieleń przy ulicach lokalnych danych Dzielnic oraz niektóre parki, skwery i zieleńce;
- ZTP – zieleń na obszarze Muranowa w tym część lokalnych drzew przyulicznych (ulice wymienione są na ich stronie⁵);
- ZPTP – niektóre drzewa przyuliczne, parki, skwery i zieleńce na terenie dzielnicy Praga Północ;
- Zarząd Zieleni Warszawy – drzewa rosnące nad Wisłą (docelowo mają stopniowo przejmować zarząd nad większością zieleni miejskiej).

Schemat systemu zarządzania zielenią miejską przedstawia poniższy wykres (Wykres 1):

³ Wrzesień, M., 2017. BOŚ, Warszawa (komunikacja mailowa)

⁴ ZDM - Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie

⁵ <http://ztp.waw.pl/> Dostęp Sierpień 2017.

Wykres 1: Schemat systemu zarządzania zielenią miejską w Warszawie



Źródło: Wrzesień, M., 2017. BOŚ, Warszawa (komunikacja mailowa)

gdzie:

ZOM - Zarząd Oczyszczania Miasta;

WOŚ - Wydziały Ochrony Środowiska poszczególnych Dzielnic Warszawy;

ZTP - Zarząd Terenów Publicznych;

ZPTP - Zarząd Praskich Terenów Publicznych;

ZZW - Zarząd Zieleni Warszawy;

Dużym wyzwaniem dla podmiotów odpowiedzialnych za zielen miejską w Warszawie jest słaba kondycja drzew przyulicznych. Zjawisko zamierania drzew przyulicznych w Warszawie nie jest nowe, a skala tego zjawiska jest niepokojąca, co obrazują poniższe fakty:

- W latach 1973-87 straty drzew ocenia się na 26 tysięcy egzemplarzy (Dmuchowski, Bandurek 2001⁶; Szczepanowska 2001⁷);
- W latach 1982-2006 wycięto około połowy drzew rosnących przy głównych ulicach miasta, (Borowski, Latocha, 2006⁸);

⁶ Dmuchowski W., Bandurek M., 2001., Stan zieleni przyulicznej w Warszawie na podstawie wieloletnich obserwacji i doświadczeń Ogrodu Botanicznego - CZRB PAN. W: Zielen Warszawy problemy i nadzieje. Mat. konf. Warszawa-Powsin, Ogród Botaniczny PAN (Dmuchowski W., Niekrasz K., red.), Warszawa, 4.10.2001: 19-31.

⁷ Szczepanowska H. B., 2001, *Drzewa w mieście*. Hortpress, Warszawa

⁸ Borowski, J., Latocha, P., 2006, *Dobór drzew i krzewów do warunków przyulicznych Warszawy i miast centralnej Polski*. Rocznik dendrologiczny Vol. 54 - 2006 • 83-93

- Corocznie usuwa się w ostatnich latach ponad 1000 martwych drzew rosnących przy drogach zarządzanych przez ZDM i podobną liczbę drzew się dosadza (dane niepublikowane Zarządu Oczyszczania Miasta – Działu Zieleni w Warszawie 2017).

Wśród istniejącej zieleni miejskiej drzewa przyuliczne, szczególnie te rosnące przy ruchliwych drogach są najbardziej narażone na działanie presji środowiska miejskiego, a z drugiej strony mają największy potencjał do świadczenia regulacyjnych usług ekosystemowych. Z tego powodu istotne jest poznanie czynników prowadzących do szybkiego ich zamierania. Jak podkreślają liczni autorzy do zamierania drzew przyulicznych w Warszawie obok zasadniczej degradacji siedliska, przyczynia się niewłaściwy dobór roślin. Dotychczas propagowane doборы roślin zwykle nie uwzględniają bowiem specyfiki siedlisk przyulicznych (Bugala i in. 1984⁹, Siewniak, Czekalski 2001¹⁰, Borowski J., Latocha P., 2006¹¹). Zauważając problem BOŚ w 2016 roku opracowało dokument „Standardy kształtowania zieleni Warszawy”¹². Standardy te mają wspomagać pracę miejskich organów administracji w procesie kształtowania zieleni Warszawy. Do tego czasu brak było, poza fragmentarycznymi wskazaniem, całościowego opracowania dotyczącego tego zagadnienia. W Warszawie, gdzie za utrzymanie zieleni odpowiedzialnych jest kilka podmiotów, wprowadzenie standardów wydaje się ze wszech miar konieczne. Tego rodzaju dyrektywy są już wdrożone w wielu miastach europejskich, w Polsce – w Krakowie i we Wrocławiu. W Warszawie, różne instytucje zajmujące się zielenią miejską przy wyborze odpowiednich gatunków do nasadzeń dotychczas w znacznej mierze opierały się o doświadczenia wąskiej grupy swoich pracowników. Taka też była sytuacja w ZOM - głównej jednostce odpowiedzialnej za podejmowanie decyzji dotyczących składu gatunkowego drzew do nasadzeń przy ulicach krajowych, wojewódzkich i powiatowych, gdzie były one podejmowane przede wszystkim na bazie doświadczenia swoich wysoko wykwalifikowanych ekspertów.

W dokumencie z 2016 zwrócono uwagę, iż „*odpowiedni dobór drzew, zwłaszcza w trudnych dla wzrostu roślin warunkach miejskich jest podstawą powodzenia ich uprawy*”. Zaprezentowano w

⁹ Bugala W., Chylarecki H., Bojarczuk T. 1984. Dobór drzew i krzewów do obsadzania ulic, placów i w miastach z uwzględnieniem kryteriów rejonizacji. Arboretum Kórnickie 29: 35-62.

¹⁰ Siewniak M., Czekalski M., 2001, *Historia rozwoju miejskich terenów zieleni i zmian ich funkcji*, Międzynarodowe Towarzystwo Uprawy i Ochrony Drzew, Kluczbork.

¹¹ Borowski J., Latocha P., 2006. Dobór drzew i krzewów do warunków przyulicznych Warszawy i miast centralnej Polski. Rocznik dendrologiczny Vol. 54 – 2006 • 83–93

¹² Borkowski J i in, 2016, *Standardy kształtowania zieleni Warszawy*, Opracowanie wykonane przez Polskie Towarzystwo Dendrologiczne dla Miasta Stołecznego Warszawy.

nim jakie elementy siedliskowe i przestrzenne mogą negatywnie wpływać na kondycję drzew. Zaznaczono jednak, iż *„właściwy dobór zależy od konkretnych warunków siedliskowych i przestrzennych. Rośliny należy dobierać kierując się ich preferencjami, co do rodzaju, wilgotności i zasobności gleby, wymaganiami świetlnymi oraz przestrzennymi, aby w przyszłości uniknąć kolizji z innymi drzewami i infrastrukturą miejską”*. Zwrócono również uwagę na znaczenie regulacyjnych usług ekosystemowych. Stwierdzono, że *„w lokalizacji i doborze drzew należy uwzględniać ich właściwości fitoremediacyjne”*, a także że *„wzrost inflacji powierzchniowej można uzyskać poprzez sadzenie drzew dużych gatunków”*. W dokumencie tym znajdziemy również przykładowe nazwy gatunków, jakie są rekomendowane do sadzenia bezpośrednio przy ulicach o dużym natężeniu ruchu kołowego biorąc, pod uwagę szczególnie cztery kryteria:

- Tolerancja na podwyższone zasolenie drzew;
- Tolerancja na suszę drzew;
- Stanowisko - wymagania świetlne drzew;
- Właściwości fitoremediacyjne (usuwanie z powietrza pyłków zawieszonych, tlenków azotu, ozon) drzew.

Wydaje się jednak, że dokument ten nie przynosi rewolucji w systemie zarządzania zielenią miejską w Warszawie. Po pierwsze należy oczekiwać, iż wiedzę specjalistyczną zaprezentowaną w dokumencie eksperci odpowiedzialni za zielen miejską już mają, co potwierdza ich kierunkowe wykształcenie. Po drugie dokument ten ma jedynie charakter doradczy, a ostateczną decyzję o wyborze konkretnego gatunku do nasadzenia w danej lokalizacji w dalszym ciągu musi podjąć osoba odpowiadająca za nasadzenia w danej jednostce. Wynika to między innymi z faktu, że choć niektóre drzewa są generalnie zalecane do nasadzeń przyulicznych (np. *Ginkgo biloba* czy *Platanus ×hispanica*), to nie powinny być sadzone w konkretnych warunkach siedliskowych (np. miejscach wietrznych). Tym samym oczekuje się, że decyzje będą finalnie w dalszym ciągu podejmowane w oparciu o doświadczenie i wiedzę ekspercką wąskiej grupy pracowników danej jednostki podległej BOŚ.

Analiza tego dokumentu pozwala jednak zauważyć, że władzom miasta (BOŚ) zależy na takim składzie gatunkowym drzew miejskich, który będzie charakteryzował się dużą zdrowotnością i potencjałem do świadczenia regulacyjnych usług ekosystemowych. Jest to zachowanie typowe dla

miasta zarządzanego w sposób hierarchiczny, gdzie najwyższe kierownictwo co do zasady jest zainteresowane zwiększeniem dobrobytu swoich wyborców. Jednocześnie funkcjonariusze niższego rzędu nie muszą brać pod uwagę tych samych obaw – oni są zainteresowani maksymalizowaniem swojej korzyści pod pewnymi ograniczeniami nałożonymi przez swoich szefów. Jest to standardowy hierarchiczny model teorii agencji. W prezentowanym badaniu autorzy analizują problem optymalnego zarządzania terenami zieleni miejskiej w Warszawie dwupoziomowo: - BOŚ jako bezpośredni reprezentant Prezydenta Miasta Warszawy (przełożony), który sprawuje kontrolę nad jednym z oddziałów wykonawczych – Zarządem Oczyszczania Miasta (podwładny), odpowiedzialnym za zielen przyuliczną. Podczas gdy Prezydent Miasta jest zainteresowany posiadaniem optymalizującej dobrobyt mieszkańców zielenią przyuliczną, kierownictwo ZOM niekoniecznie. Co więcej, występuje problem asymetrii informacji. Kierownictwo ZOM posiada doświadczenie i wiedzę ekspercką która pozwala zwiększyć strumień usług ekosystemowych świadczonych przez drzewa przyuliczne, podczas gdy Prezydent Miasta (BOŚ) nie ma takiej wiedzy.

Wykorzystując notację typową dla modelu przełożony-podwładny [Mas-Colell *i in.* 1995]¹³, można stwierdzić że BOŚ (przełożony) chce maksymalizować wyrażenie:

$$B(x)-s(x)$$

gdzie:

$B(x)$ to korzyści netto świadczone przez zielen miejską;

$s(x)$ to wynagrodzenie kierownictwa ZOM;

x to poziom wysiłku wkładanego w poprawę/utrzymanie kondycji zieleni miejskiej,

podczas gdy kierownictwo ZOM chce maksymalizować wyrażenie:

$$s(x)-c(x)$$

gdzie:

$c(x)$ to koszt wysiłku, który spełnia ograniczenie:

$$s(x)-c(x) \geq u^0$$

gdzie:

u^0 to poziom aspiracji (nieznany) pracownika.

¹³ Mas-Colell, A., M. D. Whinston, and J. R. Green, 1995. *Microeconomic Theory*, Oxford University Press, New York

Uwzględniając typowe warunki wypukłości funkcji, kontrakt poprawny motywacyjnie wymaga aby kierownictwo ZOM (podwładny) było rezydualnym (resztowym) pretendentem do zysków BOŚ (przełożonego), tj. $\partial B/\partial x = \partial c/\partial x$. Sytuacja taka jednak nie ma miejsca w Warszawie. Pensja kierownictwa ZOM nie jest w żaden sposób uzależniona od strumienia usług świadczonych przez drzewa miejskie, ani nawet od samej ilości drzew. Warunki takie nie sprzyjają maksymalizacji wysiłku wkładanego w poprawę/utrzymanie kondycji zieleni miejskiej. W rezultacie może to skutkować nieoptymalnym z punktu widzenia dobrobytu społecznego strumieniem wartości usług ekosystemowych świadczonych przez drzewa przyuliczne w Warszawie.

Według wiedzy autorów nie istnieją badania ekonomiczne analizujące problem zarządzania zielenią miejską w wykorzystaniem modelu przełożony-podwładny. Istnieje niedawna publikacja wykorzystująca ten model [Hotte *i in.* 2016]¹⁴, lecz odnosi się ona do problemu zagospodarowania przestrzennego, a nie sadzenia drzew w miastach. Wiele prac odwołuje się do modelu przełożony-podwładny [Guzy *et al.* 2008]¹⁵, ale nie skupiają się one na konflikcie motywacyjnym badanych podmiotów. Kronenberg [2015]¹⁶ w swoim badaniu analizuje inne poza problemem przełożony-podwładny bariery instytucjonalne, które mogą negatywnie wpływać na efektywność zarządzania zielenią miejską.

2. Materiały i metody

Korzyści świadczone przez żywe i zdrowe drzewa są bezsporne. Niemniej problemem jest to, że część drzew obumiera zanim osiągnie wiek dojrzały lub charakteryzuje je wysoki poziom posuszu. Przykład drzew rosnących przy głównych arteriach Warszawy jest adekwatny, gdzie setki drzew jest sadzonych co roku przez ZOM. Część z nich dożywa wieku dojrzałego, ale znaczna część obumiera. Istnieje wiele powodów dlaczego drzewa przyuliczne obumierają. Jednym z nich jest sadzenie gatunków obcych, które nie nadają się do sadzenia w naszej strefie klimatycznej. W rezultacie jeżeli nie zastosuje się wyjątkowych i kosztownych środków ochrony, drzewo będzie obumierało w wyniku surowych warunków klimatycznych, ataku szkodników lub innych

¹⁴ Hotte, N., C. Mahony, and H. Nelson, 2016. "The principal-agent problem and climate change adaptation on public lands", *Global Environmental Change* 36: 163–174

¹⁵ Guzy, M. R., C. L. Smith, J. P. Bolte, D. W. Hulse and S. V. Gregory, 2008. "Policy research using agent-based modeling to assess future impacts of urban expansion into farmlands and forests", *Ecology and Society* 13(1): 37 [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art37/>

¹⁶ Kronenberg, J., 2015. "Why not to green a city? Institutional barriers to preserving urban ecosystem services", *Ecosystem Services* 12: 218–227

przyczyn. Po drugie drzewa mogły być posadzone w niewłaściwy sposób, nie spełniając wymagań jakie dany gatunek potrzebuje do prawidłowego wzrostu. Po trzecie drzewa mogą nie być prawidłowo pielęgnowane, szczególnie w pierwszych latach po zasadzeniu. Na przykład mogły nie być wystarczająco często podlewane. Po czwarte drzewa mogły być narażone na działanie zanieczyszczeń środowiska np. chlorki [Nowocin 2017]¹⁷.

W wielu wypadkach dobór gatunków drzew, które lepiej radzą sobie w klimacie Polski, są mniej wymagające jeżeli chodzi o warunki siedliskowe, bardziej odporne na działanie presji miejskiej (w tym zanieczyszczenie powietrza), a także są mniej wymagające w pielęgnacji może potencjalnie przyczynić się do poprawy wskaźnika śmiertelności i posuszu drzew miejskich rosnących w Warszawie.

W badaniu sprawdzono czy urzędnicy ZOM przy wyborze gatunków do nasadzeń biorą pod uwagę następujące parametry (czy istnieje istotny statystyczny związek pomiędzy liczbą sadzonych drzew danego gatunku a danym parametrem):

1. Potencjalna zdolność do świadczenia usług ekosystemowych przez drzewa;
2. Wskaźnik śmiertelności drzew;
3. Wskaźnik posuszu drzew;
4. Koszt zakupu i posadzenia drzew;
5. Struktura gatunkowa drzew przedwcześnie zamierających.

W badaniu wykorzystano wyliczenia wykonane na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco (Szkop, 2017)¹⁸, a także dane dotyczące nasadzeń gatunków drzew przez ZOM w latach 2012-2016 (Nowocin, 2017)¹⁹.

Ad. 1)

Zdolność drzew do świadczenia usług ekosystemowych zależy od powierzchni ich listowia (LA). Aby określić potencjalną tj. maksymalną (w 100% żywą) powierzchnię listowia (LA_{max}) drzewa danego gatunku w danym wieku wyznaczono równanie regresji liniowej dwóch zmiennych:

¹⁷ Nowocin, K., 2017. ZOM, Warszawa (komunikacja osobista)

¹⁸ Szkop, Z. 2017. Wartość ekonomiczna usług ekosystemów świadczonych przez drzewa miejskie. Working paper

¹⁹ Nowocin, K., 2017. ZOM, Warszawa (dane w formie elektronicznej)

$$y = \alpha + \delta_1 x_1 + \delta_2 x_2$$

gdzie:

y to maksymalna powierzchnia listowia (L_{Amax}) drzewa danego gatunku;

x_1 to wiek drzewa;

x_2 to wskaźnik posuszu.

Następnie za x_2 przyjęto wartość 0, zakładając że drzewo to nie wykazuje oznak posuszu. Przyjmując za x_1 wartości od 1 do 40 i sumując otrzymane wyniki obliczono potencjalną powierzchnię listowia świadczącą usługi ekosystemowe przez okres 40 lat. Potencjalna zdolność drzew do świadczenia usług ekosystemowych w takim okresie czasowym ($L_{Amax1-40}$) może być zatem zapisana jako:

$$L_{Amax1-40} = L_{Amax1} + L_{Amax2} + L_{Amax3} + \dots + L_{Amax39} + L_{Amax40}$$

gdzie:

L_{Amax_i} to maksymalna powierzchnia listowia drzewa danego gatunku w wieku i lat.

Aby upewnić się, że otrzymane wyniki nie są wrażliwe na przyjęty horyzont czasowy, sprawdzano również, czy występuje związek pomiędzy liczbą sadzonych drzew danego gatunku a ich maksymalną powierzchnią listowia w innym wieku od 10 do 100 lat (L_{Amax10} , L_{Amax20} ... $L_{Amax100}$).

Ad. 2) i 3)

Wskaźniki posuszu i śmiertelności drzew zostały obliczone dla każdego gatunku osobno w podziale na dwie grupy wiekowe:

- Drzewa w wieku 0-10 lat;
- Drzewa w wieku 10-40 lat.

Dokonano podziału na dwie grupy wiekowe, gdyż przez kilka pierwszych lat drzewa charakteryzuje wyższy poziom posuszu (nieznacznie) i śmiertelności (wyraźnie), a po tych pierwszych latach stabilizuje się on.

Wskaźnik posuszu (P) został określony jako średni zaobserwowany posusz wśród żywych drzew danego gatunku w danej grupie wiekowej $P=(p_1+p_2+p_3+...+p_n)/n$.

gdzie:

p_i to zaobserwowany posusz danego drzewa;

n to łączna liczba drzew danego gatunku.

Wskaźnik śmiertelności (S) został obliczony dla każdego gatunku drzew jako $S=nd/N$

gdzie:

nd – liczba drzew martwych ($P=100\%$) w danej grupie wiekowej;

N – wszystkie drzewa danego gatunku w danej grupie wiekowej.

Ad. 4)

Koszt zakupu i posadzenia drzew został ustalony na podstawie danych otrzymanych z ZOM²⁰ dotyczących cen zakupu i posadzenia drzew w formie piennej danego gatunku o obwodzie 14-18 cm w latach 2012-2016.

Ad. 5)

Struktura gatunkowa drzew przedwcześnie zamierających została ustalona na podstawie drzew przyulicznych zidentyfikowanych podczas inwentaryzacji przeprowadzonej w roku 2011 jako martwe (posusz 100%). Uwzględniono jedynie drzewa w wieku do 40 lat, aby wykluczyć śmierć naturalną drzewa.

Kolejnym etapem badania było porównanie na podstawie danych empirycznych wybranych gatunków drzew o różnych potencjalnych i rzeczywistych (po uwzględnieniu współczynników śmiertelności i posuszu) strumieniach usług ekosystemowych w celu wykazania, iż możliwa jest poprawa efektywności zarządzania terenami zieleni miejskiej w Warszawie.

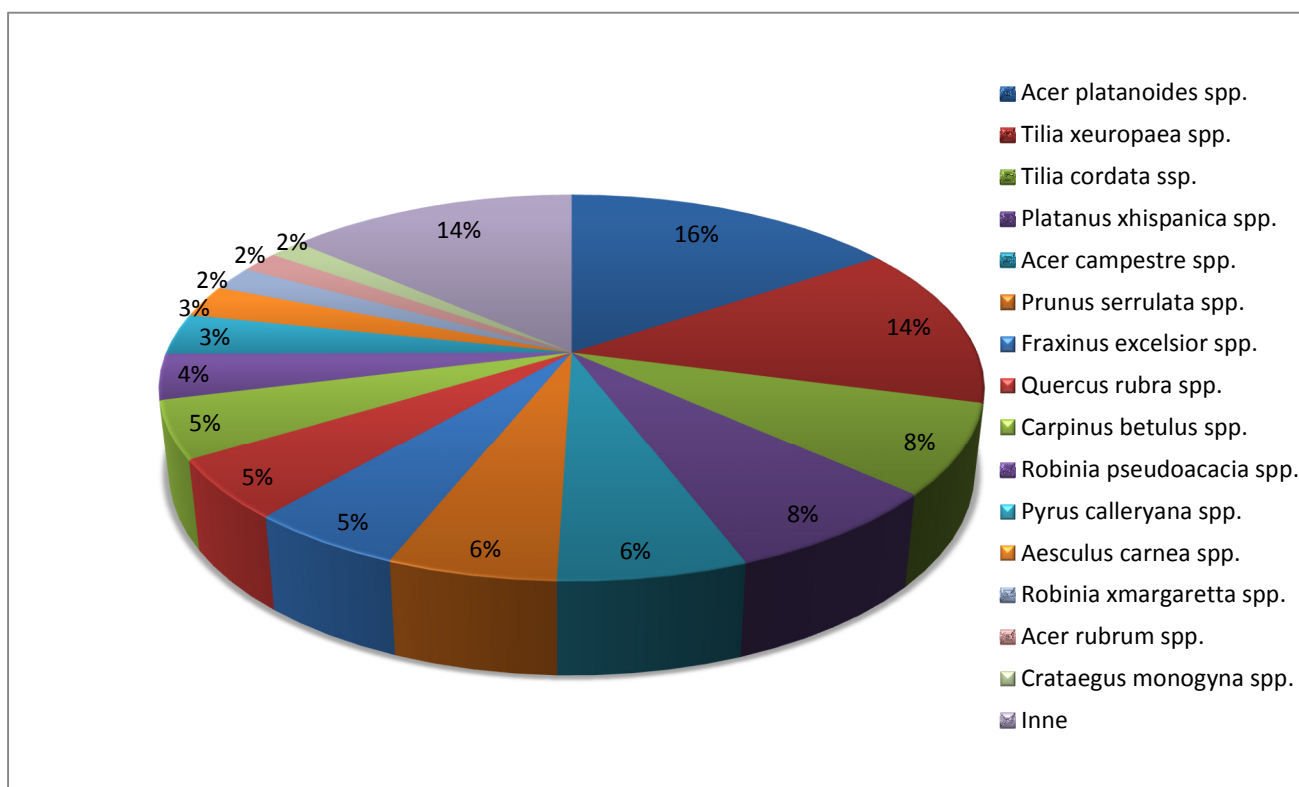
Rezultaty

3.1 Struktura gatunkowa

²⁰ Nowocin, K., 2017. ZOM, Warszawa (dane w formie elektronicznej)

W latach 2012-2016 ZOM zlecił posadzenie 3874 drzew przyulicznych. Najczęściej sadzonymi gatunkami drzew były: *Acer platanoides* spp. (Klon zwyczajny) (589 szt.), *Tilia xeuropaea* spp. (Lipa holenderska) (514 szt.), *Tilia cordata* spp. (Lipa drobnolistna) (286 szt.), *Platanus xhispanioca* (Platan klonolistny) (284 szt.) oraz *Acer campestre* spp. (Klon polny) (237 szt.). Tych pięć gatunków stanowiło ponad połowę wszystkich nasadzeń. Wszystkie te gatunki charakteryzują się dużym rozmiarem w wieku dojrzałym. Udział procentowy poszczególnych gatunków przedstawia wykres poniżej²¹:

Wykres 2. Struktura gatunkowa drzew zasadzonych przez ZOM w latach 2012 -2016.



Źródło: Nowocin, K., 2017. ZOM, Warsaw (Dane w formie elektronicznej).

Analizie poddano czynniki, jakie kierownictwo ZOM potencjalnie mogło brać pod uwagę, wybierając gatunki do posadzenia wzdłuż głównych arterii Warszawy. Czynniki te były:

a) Potencjalna zdolność do świadczenia usług ekosystemowych przez drzewa;

²¹ Pełna lista gatunków jakie ZOM zlecił do posadzenia w latach 2012-2016 przedstawia tabela stanowiąca Aneks I

- b) Wskaźnik śmiertelności drzew;
- c) Wskaźnik posuszu drzew;
- d) Koszt zakupu i posadzenia drzew;
- e) Struktura gatunkowa drzew przedwcześnie zamierających.

3.2 Potencjalna zdolność do świadczenia usług ekosystemowych przez drzewa

Wartość świadczonych usług ekosystemowych jest bezpośrednio powiązana z powierzchnią listowia (LA) danego drzewa, tym samym przy porównywaniu potencjału drzew do świadczenia usług ekosystemowych najwygodniej jest posługiwać się właśnie tym wskaźnikiem.

Analiza regresji wykazała, iż jeśli LA zostanie zwiększona o jedną jednostkę, to znaczy powierzchnia listowia zostanie zwiększona o jeden metr kwadratowy, to przeciętna roczna wielkość pochłanianych zanieczyszczeń w Warszawie wzrośnie o: 1,06 g O₃, 0,53g NO₂, 0,08g SO₂, 0,04g PM_{2,5}, a także zostanie ograniczony spływ 2,01 l wody opadowej (Tabela1).

Tabela 1. Wpływ rozmiaru LA na wielkość świadczenia usług ekosystemowych

Usługa ekosystemowa	Wartość (g, l)	R	R²
O₃	1,06	0,976	0,953
NO₂	0,53	0,875	0,766
SO₂	0,08	0,990	0,980
PM_{2,5}	0,04	0,984	0,968
Ograniczenie spływu	2,01	0,999	0,998

Źródło: Wyliczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Analizując współczynnik korelacji można zauważyć, iż, występuje praktycznie pełna zależność między rozmiarem powierzchni listowia a wielkością pochłaniania O₃, SO₂ oraz PM_{2,5} oraz zatrzymywania wody opadowej, a także bardzo silna zależność między rozmiarem powierzchni listowia a wielkością pochłaniania NO₂, którego stężenie w powietrzu charakteryzuje się największym zróżnicowaniem w obrębie miasta. Wielkość powierzchni listowia wyjaśnia od 77 do niemal 100% zmienności (wariancji) w zakresie zdolności drzew do świadczenia usług ekosystemowych (p=0).

Potencjał zdrowych drzew do świadczenia usług ekosystemowych do 40 roku życia przedstawia Tabela 2.

Tabela 2: Skumulowany potencjał zdrowych drzew różnych gatunków do świadczenia usług ekosystemowych w wieku od 0 do 40 lat

Gatunek	Liczba drzew	LAm₀₋₄₀
<i>Acer platanoides</i> spp.	589	3250,09
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	514	3554,02
<i>Tilia cordata</i> ssp.	286	3584,96
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	284	3064,72
<i>Acer campestre</i> spp.	237	1948,30
<i>Prunus serrulata</i> spp.	212	1163,18
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196	2805,23
<i>Quercus rubra</i> spp.	189	2348,30
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183	1620,94
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	144	2348,61
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	130	880,36
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102	5311,03
<i>Robinia xmarginata</i> spp.	76	2179,11
<i>Acer rubrum</i> spp.	67	2854,80
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60	765,43
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59	2580,71
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	58	3545,13
<i>Quercus robur</i> spp.	53	1617,22
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	46	3855,18
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	38	2993,29
<i>Populus tremula</i> spp.	37	6804,41
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	35	987,86
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	33	1441,72
<i>Betula pendula</i> spp.	27	1193,43
<i>Prunus virginiana</i> spp.	22	1196,76
<i>Malus xmoerlandsii</i> spp.	20	1222,58
<i>Crataegus xmedia</i> spp.	17	902,13
<i>Sorbus aria</i> spp.	13	1143,20
<i>Prunus calleriana</i> spp.	9	1196,76
<i>Quercus frainetto</i> spp.	9	1514,12
<i>Betula utilis</i> spp.	8	1198,32
<i>Prunus eminens</i> spp.	7	1196,76
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	6	1445,13
<i>Quercus palustris</i> spp.	5	1514,12
<i>Crataegus xlauii</i> spp.	4	493,78
<i>Quercus ximundorum</i> spp.	4	1485,73

<i>Quercus ×warei</i> spp.	3	1524,77
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	2	1414,18

Źródło: Wyliczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Istnieje dodatni umiarkowanie silny związek ($R=0,35$) pomiędzy liczbą sadzonych drzew danego gatunku a ich rozmiarem (potencjalną sumą powierzchni listowia do 40 roku życia). Jest to związek istotny statystycznie ($p=0,033$). Sprawdzono również, czy taki związek jest zauważalny niezależnie od przyjętego horyzontu czasowego, dla drzew od 10 do 100 lat. (Tabela 3).

Tabela 3: Potencjał zdrowych drzew różnych gatunków do świadczenia usług ekosystemowych w zależności od ich wieku

Gatunek	Liczba drzew	LA max10	LA max20	LA max30	LA max40	LA max50	LA max60	LA max70	LA max80	LA max90	LA max100
<i>Acer campestre</i> spp.	589	37,94	78,29	121,82	165,36	195,48	235,06	265,18	296,41	333,77	365,00
<i>Acer platanoides</i> spp.	514	41,95	85,69	132,74	179,79	215,06	258,43	293,70	327,59	368,77	402,66
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	286	41,63	86,40	134,54	182,69	218,78	263,16	299,25	333,93	376,07	410,75
<i>Acer rubrum</i> spp.	284	34,63	73,75	115,95	158,15	187,35	225,71	254,91	285,18	321,39	351,67
<i>Aesculus carnea</i> spp.	237	22,49	47,31	73,01	98,71	132,23	159,14	192,66	212,89	239,79	260,01
<i>Betula pendula</i> spp.	212	15,27	27,86	42,17	56,47	68,23	81,34	93,09	129,78	145,67	182,36
<i>Betula utilis</i> spp.	196	34,57	66,76	104,03	141,30	174,10	208,44	241,25	264,66	297,45	320,87
<i>Carpinus betulus</i> spp.	189	25,69	55,59	90,21	124,83	155,30	187,20	217,67	239,42	269,88	291,63
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	183	21,72	38,87	58,35	77,83	93,83	111,68	127,69	177,65	199,29	249,25
<i>Crataegus ×lavalleyi</i> spp.	144	30,96	57,58	84,19	110,80	135,94	162,26	187,39	209,61	235,27	257,49
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	130	8,87	20,86	34,49	48,11	59,31	71,79	82,99	117,93	133,06	168,00
<i>Crataegus ×media</i> spp.	102	64,80	132,87	193,37	253,88	313,99	377,44	437,55	481,78	542,41	586,65
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	76	28,90	53,43	77,96	102,49	125,66	149,92	173,09	193,58	217,23	237,71
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	67	34,31	68,83	106,08	143,32	169,09	202,95	228,72	255,44	287,40	314,12
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	60	10,16	18,34	27,65	36,95	44,60	53,12	60,77	84,62	94,96	118,82
<i>Malus ×moerlandsii</i> spp.	59	28,88	61,15	98,51	135,88	168,76	203,20	236,08	259,56	292,43	315,91
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	58	40,76	85,41	133,44	181,46	217,46	261,73	297,73	332,32	374,35	408,95
<i>Populus tremula</i> spp.	53	17,30	39,20	61,88	84,57	114,14	137,89	167,47	185,33	209,07	226,92
<i>Prunus calleryana</i> spp.	46	52,52	91,11	138,85	186,59	230,18	277,08	320,67	367,51	413,99	460,84
<i>Prunus eminens</i> spp.	38	35,23	72,12	111,93	151,74	179,28	215,46	243,00	271,56	305,71	334,27
<i>Prunus serrulata</i> spp.	37	80,99	166,49	251,98	337,47	372,80	448,26	483,59	512,66	577,31	606,39
<i>Prunus virginiana</i> spp.	35	9,95	23,41	38,70	54,00	66,57	80,58	93,15	132,38	149,36	188,59
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	33	19,04	35,13	51,79	68,45	90,18	107,63	129,36	142,47	159,91	173,03

<i>Quercus xwarei</i> spp.	27	14,69	28,80	44,02	59,24	80,24	96,17	117,16	132,32	148,79	163,94
<i>Quercus frainetto</i> spp.	22	16,43	28,73	42,71	56,69	68,18	80,99	92,48	128,33	143,86	179,71
<i>Quercus palustris</i> spp.	20	16,43	29,32	43,97	58,62	70,66	84,08	96,12	133,69	149,96	187,54
<i>Quercus robur</i> spp.	17	12,28	21,65	32,29	42,93	51,68	61,43	70,18	97,47	109,29	136,59
<i>Quercus rubra</i> spp.	13	14,02	27,30	42,39	57,48	69,88	83,71	96,11	134,81	151,56	190,26
<i>Quercus ximundorum</i> spp.	9	16,43	28,73	42,71	56,69	68,18	80,99	92,48	128,33	143,86	179,71
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	9	17,20	36,75	57,00	77,25	103,65	124,86	151,26	167,20	188,39	204,33
<i>Robinia xmarginata</i> spp.	8	13,79	28,85	45,10	61,35	83,77	100,77	123,19	139,37	156,95	173,13
<i>Sorbus aria</i> spp.	7	16,43	28,73	42,71	56,69	68,18	80,99	92,48	128,33	143,86	179,71
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	6	17,67	35,14	53,24	71,33	94,93	113,88	137,48	151,72	170,67	184,91
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	5	18,32	37,75	57,87	77,99	104,23	125,30	151,54	167,37	188,43	204,27
<i>Tilia cordata</i> spp.	4	10,15	18,16	4,33	36,37	43,85	52,19	59,67	83,02	93,13	116,47
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	4	16,23	36,03	56,54	77,04	103,79	125,26	152,00	168,14	189,60	205,74
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	3	16,21	37,80	57,90	78,01	104,22	125,27	151,49	167,31	188,35	204,18
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	2	15,67	30,08	56,33	82,57	109,33	136,09	162,86	184,47	206,08	227,70

Źródło: Wylczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Analiza regresji potwierdziła, że istnieje istotny statystycznie związek (od $p=0,0489$ dla drzew w wieku 10 lat do $p=0,018$ dla drzew w wieku 100 lat) pomiędzy ilością sadzonych drzew a ich potencjałem do świadczenia usług ekosystemowych, niezależnie od ich wieku. Jest to związek umiarkowanie silny ($0,32 > R > 0,38$).

Można zatem uznać, że kierownictwo ZOM przy wyborze gatunków drzew do nasadzeń w Warszawie bierze pod uwagę ich potencjalną zdolność do świadczenia usług ekosystemowych, faworyzując drzewa charakteryzujące się większą powierzchnią LA.

3.3 Wskaźnik śmiertelności drzew

Tempo zamierania drzew w miastach jest jednym z bardzo istotnych wskaźników efektywności zarządzania zasobami drzew. Wskaźnik śmiertelności drzew przyulicznych najczęściej zamyka się w ramach następujących wielkościach [McPherson, 2014]²²:

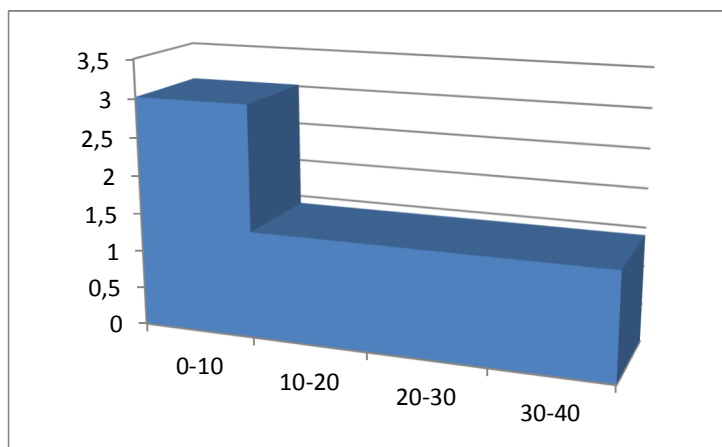
²² McPherson, E.G., 2014. Monitoring million trees LA: tree performance during the early years and future benefits. *Arboricult. Urban For.* 40, 285–300

a) Niska śmiertelność (1% rocznie w ciągu pierwszych pięciu lat i 0,5% w ciągu 30 następnych lat);

b) Wysoka śmiertelność (5 % rocznie w ciągu pierwszych pięciu lat i 2% w ciągu 30 następnych lat.

Wysokie tempo zamierania drastycznie ogranicza liczbę drzew dorastających do dojrzałości i zmniejsza w dużym stopniu efekty zarządzania. Dla drzew przyulicznych rosnących w Warszawie śmiertelność obliczono osobno dla drzew w wieku do 10 lat i od 10 do 40 lat. Wyniki ogólne prezentuje wykres poniżej.

Wykres 2. Śmiertelność drzew przyulicznych rosnących w Warszawie



Źródło: Opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych z BOS

Średnia śmiertelność wśród drzew przyulicznych w Warszawie w wieku do 10 lat jest dość wysoka i wynosi 3,02%. Średnia śmiertelność wśród drzew w wieku 10-40 lat jest również dosyć wysoka i wynosi 1,40%. Śmiertelność różni się jednak wyraźnie w podziale na poszczególne gatunki drzew. Informacje te prezentuje Tabela 4.

Tabela 4. Śmiertelność (%) drzew przyulicznych rosnących w Warszawie w podziale na gatunki

Gatunek	Liczba drzew	Śmiertelność ₀₋₁₀	Śmiertelność ₁₀₋₄₀
<i>Acer campestre</i> spp.	589	1,78	1,42
<i>Acer platanoides</i> spp.	514	1,97	1,37
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	286	3,67	1,77
<i>Acer rubrum</i> spp.	284	1,99	1,28
<i>Aesculus carnea</i> spp.	237	4,04	0,73
<i>Betula pendula</i> spp.	212	3,36	0,53

<i>Betula utilis</i> spp.	196	3,89	0,90
<i>Carpinus betulus</i> spp.	189	0,60	1,21
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	183	1,71	1,67
<i>Crataegus ×lavalleyi</i> spp.	144	2,48	1,45
<i>Crataegus ×media</i> spp.	130	2,48	1,45
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	102	2,48	0,94
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	76	2,49	1,49
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	67	1,00	0,98
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	60	7,20	0,66
<i>Malus ×moerlandsii</i> spp.	59	1,13	0,68
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	58	6,57	1,96
<i>Populus tremula</i> spp.	53	1,46	1,39
<i>Prunus calleryana</i> spp.	46	2,85	2,77
<i>Prunus eminens</i> spp.	38	2,44	2,10
<i>Prunus serrulata</i> spp.	37	2,72	2,57
<i>Prunus virginiana</i> spp.	35	2,44	2,77
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	33	0,82	0,72
<i>Quercus ×warei</i> spp.	27	5,92	1,24
<i>Quercus frainetto</i> spp.	22	5,92	1,24
<i>Quercus palustris</i> spp.	20	5,91	1,24
<i>Quercus robur</i> spp.	17	4,96	1,23
<i>Quercus rubra</i> spp.	13	6,73	2,00
<i>Quercus xhimundorum</i> spp.	9	4,08	1,24
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	9	2,17	0,74
<i>Robinia xmarginata</i> spp.	8	2,47	1,26
<i>Sorbus aria</i> spp.	7	2,02	1,74
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	6	2,20	2,31
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	5	0,58	1,80
<i>Tilia cordata</i> spp.	4	2,00	0,88
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	4	1,89	0,51
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	3	2,13	1,01
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	2	4,17	2,09

Źródło: Opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych z BOŚ

Śmiertelność według gatunków charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem. Wśród drzew w wieku do 10 lat najniższą śmiertelność charakteryzuje *Sorbus intermedia* spp. wynosi ona 0,58%, jest zatem ona bardzo niska. Stosunkowo niską roczną śmiertelność (<2%) w wieku do 10 lat wykazują także takie gatunki jak:

- *Acer campestre* spp.
- *Acer platanoides* spp.
- *Acer rubrum* spp.

- *Carpinus betulus* spp.
- *Catalpa bignonioides* spp.
- *Fraxinus pennsylvanica* spp.
- *Malus ×moerlandsii* spp.
- *Populus tremula* spp.
- *Pyrus calleryana* spp.
- *Tilia tomentosa* spp.

Największą śmiertelnością do 10 lat charakteryzuje się *Ginkgo biloba* spp. i wynosi ona aż 7,20% rocznie, jest zatem bardzo wysoka. Wysoką roczną śmiertelność (>4%) w wieku do 10 lat wykazują także takie gatunki jak:

- *Aesculus carnea* spp.
- *Platanus xhispanica* spp.
- *Quercus ×warei* spp.
- *Quercus frainetto* spp.
- *Quercus palustris* spp.
- *Quercus robur* spp.
- *Quercus rubra* spp.
- *Quercus xbimundorum* spp.

Wśród drzew w wieku od 10 do 40 lat najniższą śmiertelność charakteryzuje *Tilia tomentosa* spp. i wynosi ona 0,51, jest zatem ona niska. Stosunkowo niską roczną śmiertelność (<1%) w wieku od 10 do 40 lat wykazują także takie gatunki jak:

- *Aesculus carnea* spp.
- *Betula pendula* spp.
- *Betula utilis* spp.
- *Crataegus monogyna* spp.
- *Fraxinus pennsylvanica* spp.
- *Ginkgo biloba* spp.
- *Malus ×moerlandsii* spp.

- *Pyrus calleryana* spp.
- *Robinia pseudoacacia* spp.
- *Tilia cordata* spp.

Wśród drzew w wieku od 10 do 40 lat najwyższą śmiertelność charakteryzuje *Prunus calleriana* spp. i wynosi ona 2,77%, jest zatem wysoka. Wysoką roczną śmiertelność (>2%) w wieku od 10 do 40 lat wykazują także takie gatunki jak:

- *Prunus eminens* spp.
- *Prunus serrulata* spp.
- *Prunus virginiana* spp.
- *Quercus rubra* spp.
- *Sorbus aucuparia* spp.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, iż:

- Niektóre gatunki cechuje duża śmiertelność w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat) jak i w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Quercus rubra* spp.);
- Niektóre gatunki cechuje duża śmiertelność w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat), ale jeżeli przetrwają ten okres, to cechuje je niska śmiertelność w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Aesculus carnea* spp.);
- Niektóre gatunki cechuje niska śmiertelność w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat), jak i w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Fraxinus pennsylvanica* spp.);
- Niektóre gatunki cechuje niska śmiertelność w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat), ale cechuje je wyższa śmiertelność w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Carpinus betulus* spp.).

Analizując współczynnik korelacji można zauważyć, iż, występuje jedynie nikła zależność między śmiertelnością gatunków w wieku 0-10 lat a częstością sadzenia gatunków ($R=0,10$), a jeszcze niższa w stosunku do drzew w wieku 10-40 lat ($R=0,065$). Analiza regresji nie dała podstaw do stwierdzenia z istotnym statystycznie prawdopodobieństwem, iż ZOM w swoich decyzjach o wyborze gatunków do nasadzeń brał pod uwagę ich roczną śmiertelność w wieku 0-10 lat lub 10-40 lat. Istnieje bowiem aż 52% prawdopodobieństwo ($p=0,516$), na uzyskanie takich wyników jakie obserwujemy lub nawet wyników wskazujących na silniejszy związek dla drzew do 10 roku

życia i 70% prawdopodobieństwo ($p=0,698$) dla drzew od 10 do 40 roku życia, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa.

3.4 Wskaźnik posuszu drzew

Jeżeli nawet drzewo dożyje do danego wieku, nie oznacza to, że świadczy potencjalny strumień usług ekosystemowych dla danego wieku. Drzewo to bowiem może okazywać oznaki posuszu. Posusz to wyrażone procentowo zjawisko obumierania drzewa (1-99%) stojącego, mogące prowadzić do jego śmierci (100%)²³

Przyczyny występowania posuszu są tożsame z przyczynami zamierania drzewa tj. sadzenie nieodpowiednich gatunków obcych, niewłaściwy sposób sadzenia drzewa, brak prawidłowej pielęgnacji, szczególnie w pierwszych latach po zasadzeniu, narażenie na nadmierne działanie zanieczyszczeń środowiska lub zbliżanie się drzewa do wieku naturalnej śmierci [Nowocin 2017²⁴, Molenda, 1980²⁵].

Średni posusz wśród drzew przyulicznych w Warszawie w wieku do 10 lat wynosi 7,56%.

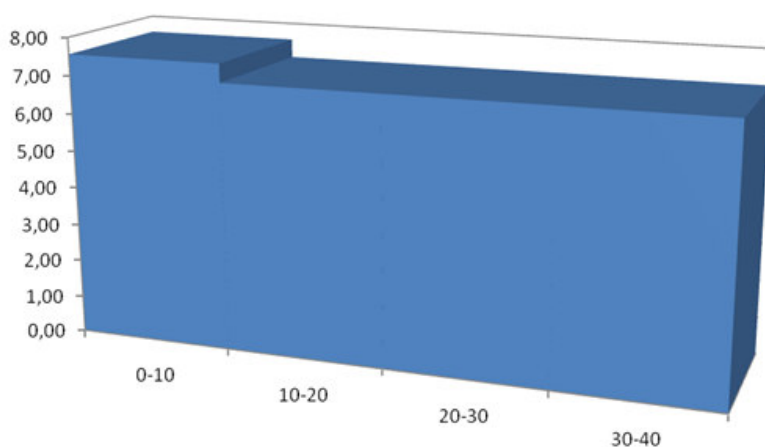
Średni posusz wśród drzew w wieku 10-40 lat wynosi 7,07% (Wykres 3).

²³ Pawlacyk P, 2012, *Natura 2000 i inne wymagania europejskiej ochrony przyrody - niezbędnik leśnika*. Świebodzin: Wydawnictwo Klubu Przyrodników.

²⁴ Nowocin, K., 2017. ZOM, Warszawa (komunikacja osobista)

²⁵ Molenda T., 1980, *Mała encyklopedia leśna*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe (PWN).

Wykres 3. Średni posusz wśród drzew przyulicznych w Warszawie



Źródło: Opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych z BOŚ

Średni posusz wśród drzew w Warszawie jest nieznacznie wyższy wśród młodych drzew niż wśród drzew powyżej dziesiątego roku życia. Posusz różni się jednak wyraźnie w podziale na poszczególne gatunki drzew, co prezentuje Tabela 5.

Tabela 5. Posusz (%) drzew przyulicznych rosnących w Warszawie w podziale na gatunki

Gatunek	Liczba drzew	Posusz ₀₋₁₀	Posusz ₁₀₋₄₀
<i>Acer platanoides</i> spp.	589	5,99	5,63
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	514	6,11	6,57
<i>Tilia cordata</i> ssp.	286	6,85	6,85
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	284	16,82	5,66
<i>Acer campestre</i> spp.	237	8,10	5,59
<i>Prunus serrulata</i> spp.	212	6,48	8,45
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196	11,92	6,73
<i>Quercus rubra</i> spp.	189	8,11	6,44
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183	3,13	4,69
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	144	4,63	5,91
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	130	6,50	7,77
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102	6,40	6,92
<i>Robinia xmargaretta</i> spp.	76	6,18	8,84
<i>Acer rubrum</i> spp.	67	7,68	6,94
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60	8,44	5,61
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59	3,52	6,86
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	58	4,91	5,87
<i>Quercus robur</i> spp.	53	9,36	6,02
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	46	6,95	7,52

<i>Acer pseudoplatanus spp.</i>	38	11,86	8,59
<i>Populus tremula spp.</i>	37	13,06	8,91
<i>Ginkgo biloba spp.</i>	35	4,64	4,04
<i>Sorbus aucuparia spp.</i>	33	9,75	7,47
<i>Betula pendula spp.</i>	27	7,94	15,87
<i>Prunus virginiana spp.</i>	22	6,20	8,19
<i>Malus ×moerlandsii spp.</i>	20	7,49	6,75
<i>Crataegus ×media spp.</i>	17	9,79	6,54
<i>Sorbus aria spp.</i>	13	8,65	6,59
<i>Prunus calleriana spp.</i>	9	6,20	8,19
<i>Quercus frainetto spp.</i>	9	7,71	7,96
<i>Betula utilis spp.</i>	8	10,82	15,04
<i>Prunus eminens spp.</i>	7	6,20	8,19
<i>Sorbus intermedia spp.</i>	6	0,82	4,29
<i>Quercus palustris spp.</i>	5	8,24	6,19
<i>Crataegus ×lavalleyi spp.</i>	4	10,32	6,29
<i>Quercus xhimundorum spp.</i>	4	8,24	6,19
<i>Quercus ×warei spp.</i>	3	8,24	6,19
<i>Catalpa bignonioides spp.</i>	2	2,97	4,29

Źródło: Opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych z BOŚ

Posusz według gatunków charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem. Wśród drzew w wieku do 10 lat najniższym posuszem charakteryzuje *Sorbus intermedia spp.* wynosi on 0,82. Stosunkowo niski posusz (<5%) w wieku do 10 lat wykazują także takie gatunki jak:

- *Catalpa bignonioides spp.*
- *Tilia tomentosa spp.*
- *Fraxinus pennsylvanica spp.*
- *Robinia pseudoacacia spp.*
- *Catalpa bignonioides spp.*

Największym posuszem do 10 roku życia charakteryzuje się *Platanus xhispanica spp.* i wynosi on aż 16,82%, jest zatem bardzo wysoki. Wysoki poziom posuszu (>10%) w wieku do 10 lat charakteryzuje także takie gatunki jak:

- *Fraxinus excelsior spp.*
- *Acer pseudoplatanus spp.*
- *Populus tremula spp.*

- *Betula utilis* spp.
- *Crataegus ×lavalleyi* spp.

Wśród drzew w wieku od 10 do 40 lat najniższy posusz charakteryzuje *Ginkgo biloba* spp. i wynosi ona 4,04, jest zatem on niski. Stosunkowo niską roczną śmiertelność (<5%) w wieku od 10 do 40 lat wykazują także takie gatunki jak:

- *Catalpa bignonioides* spp.
- *Sorbus intermedia* spp.
- *Carpinus betulus* spp.

Wśród drzew w wieku od 10 do 40 lat najwyższym posuszem charakteryzuje się *Betula pendula* spp. i wynosi ona 15,87%, jest zatem wysoka. Wysoki posusz (>8,5%) w wieku od 10 do 40 lat występuje także wśród takich gatunków jak:

- *Robinia xmarginata* spp.
- *Acer pseudoplatanus* spp.
- *Populus tremula* spp.
- *Betula utilis* spp.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, iż:

- Niektóre gatunki cechuje wysoki poziom posuszu w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat) jak i w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Betula utilis* spp.);
- Niektóre gatunki cechuje wysoki posusz w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat), a niższy w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Platanus xhispanica* spp.);
- Niektóre gatunki cechuje niski posusz w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat), jak i w wieku starszym (10-40 lat) (np. *Sorbus intermedia* spp.);
- Niektóre gatunki cechuje niższy niż przeciętna posusz w wieku kilku lat po zasadzeniu (0-10 lat), ale wyższy niż starszym (10-40 lat) (*Robinia xmarginata* spp.).

Analizując współczynnik korelacji można zauważyć, iż, występuje brak zależności między posuszem wśród gatunków w wieku 0-10 lat a częstością sadzenia gatunków ($R=0,007$), oraz bardzo słaba zależność w stosunku do drzew w wieku 10-40 lat ($R=0,19$). Analiza regresji nie dała

podstaw do stwierdzenia z istotnym statystycznie prawdopodobieństwem, iż ZOM w swoich decyzjach o wyborze gatunków do nasadzeń brał pod uwagę ich posusz w wieku 0-10 lat lub 10-40 lat. Istnieje bowiem aż 97% prawdopodobieństwo ($p=0,97$), na uzyskanie takich wyników jakie obserwujemy lub nawet wyników wskazujących na silniejszy związek dla drzew do 10 roku życia i 24% prawdopodobieństwo ($p=0,24$) dla drzew od 10 do 40 roku życia, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa.

3.5 Koszt zakupu i posadzenia drzew

Drzewa różnych gatunków posiadają różne ceny. Cena ta zależy od wielu czynników, między innymi od tego czy dane drzewo jest gatunkiem rodzimym czy obcym, czy jest łatwe w hodowli, ile czasu zajmuje osiągnięcie przez drzewo rozmiarów oczekiwanych przez kupującego, a także czy jest szeroko dostępne na lokalnym rynku. ZOM zakupuje drzewa na drodze procedury zamówienia publicznego. W latach 2012-2016 zostało zawartych 21 umów na zakup i posadzenie drzew przyulicznych. Poniższa tabela (Tabela 6) przedstawia średnią cenę, jaką ZOM w tym okresie płacił za zakup i posadzenie drzewa danego gatunku.

Tabela 6. Koszt zakupu i posadzenia drzew przyulicznych w Warszawie

Gatunek	Liczba drzew	Średnia cena
<i>Acer campestre</i> spp.	237	505
<i>Acer platanoides</i> spp.	589	520
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	38	549
<i>Acer rubrum</i> spp.	67	559
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102	666
<i>Betula pendula</i> spp.	27	492
<i>Betula utilis</i> spp.	8	496
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183	517
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	2	544
<i>Crataegus ×lavalleyi</i> spp.	4	518
<i>Crataegus ×media</i> spp.	17	559
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60	519
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196	502
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59	514
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	35	616
<i>Malus ×moerlandsii</i> spp.	20	554
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	284	489
<i>Populus tremula</i> spp.	37	657
<i>Prunus calleryana</i> spp.	9	466

<i>Prunus eminens spp.</i>	7	517
<i>Prunus serrulata spp.</i>	212	500
<i>Prunus virginiana spp.</i>	22	537
<i>Pyrus calleryana spp.</i>	130	528
<i>Quercus xwarei spp.</i>	3	566
<i>Quercus frainetto spp.</i>	9	869
<i>Quercus palustris spp.</i>	5	579
<i>Quercus robur spp.</i>	53	559
<i>Quercus rubra spp.</i>	189	591
<i>Quercus xbimundorum spp.</i>	4	495
<i>Robinia pseudoacacia spp.</i>	144	483
<i>Robinia xmargaretta spp.</i>	76	739
<i>Sorbus aria spp.</i>	13	446
<i>Sorbus aucuparia spp.</i>	33	578
<i>Sorbus intermedia spp.</i>	6	486
<i>Tilia cordata ssp.</i>	286	488
<i>Tilia tomentosa spp.</i>	58	539
<i>Tilia xeuropaea spp.</i>	514	500
<i>Ulmus hollandica spp.</i>	46	645

Źródło: Nowocin, K., 2017. ZOM, Warsaw (Dane w formie elektronicznej).

Średnia cena zakupu drzew przyulicznych w Warszawie w latach 2012-2016 wynosiła 550 PLN (460-869 PLN). Analiza regresji pozwala zauważyć, iż między cechami: liczba sadzonych drzew oraz koszt zakupu i posadzenia drzewa występuje słaba ujemna korelacja ($R=-0,21$), co mogłoby wskazywać, iż pracownicy ZOM przy podejmowaniu decyzji o nasadzeniach w niewielkim stopniu biorą pod uwagę koszt zakupu i posadzenia drzewa, preferując gatunki tańsze. Niemniej zakładając, że brak jest związku między analizowanymi zmiennymi można uzyskać takie wyniki lub wskazujące na jeszcze silniejszy związek w 20% wszystkich badań w rezultacie losowego błędu doboru próby ($p=0,20$). Ponieważ istnieje aż 20%-owe prawdopodobieństwo na uzyskanie takich wyników jakie obserwujemy lub nawet wyników wskazujących na silniejszy związek przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa, brak podstaw aby ją odrzucić.

3.6 Struktura gatunkowa wśród drzew przedwcześnie zamierających.

Jeżeli drzewo danego gatunku w danej lokalizacji obumrze z przyczyn innych niż naturalne, decydenci mogą:

- a) Posadzić w to samo miejsce drzewo tego samego gatunku, sądząc iż śmierć drzewa była niezwiązana z cechami danego gatunku,

- b) Zidentyfikować przyczynę śmierci drzewa i wybrać gatunek, który w większym stopniu jest odporny na dany niekorzystny czynnik,
- c) Uznać, że dane miejsce nie nadaje się na obsadzenie drzewami i zdecydować się na inną formę zagospodarowania terenu (np. posadzenie krzewów).

Intuicyjnie opcja pierwsza wymaga najmniej wysiłku i mogłaby być preferowana przez decydentów.

Poniższa tabela (Tabela 7) zawiera informacje na temat liczby drzew danych gatunków posadzonych przez ZOM w latach 2012-2016 oraz liczbę drzew w wieku do 40 lat zidentyfikowanych jako martwe (posusz 100%) podczas inwentaryzacji drzew dla lokalizacji zarządzanych przez ZOM przeprowadzonej w 2011 roku.

Tabela 7. Struktura gatunkowa wśród drzew przedwcześnie zamierających

Gatunek	Liczba drzew zasadzonych w latach 2012-2016	Liczba drzew martwych w wieku do 40 lat (dane z 2011 roku)
<i>Acer campestre</i> spp.	237	11
<i>Acer platanoides</i> spp.	589	128
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	38	28
<i>Acer rubrum</i> spp.	67	1
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102	4
<i>Betula pendula</i> spp.	27	37
<i>Betula utilis</i> spp.	8	0
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183	1
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	2	0
<i>Crataegus ×lavalleyi</i> spp.	4	0
<i>Crataegus ×media</i> spp.	17	0
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60	1
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196	44
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59	3
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	35	8
<i>Malus ×moerlandsii</i> spp.	20	1
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	284	40
<i>Populus tremula</i> spp.	37	11
<i>Prunus calleryana</i> spp.	9	0
<i>Prunus eminens</i> spp.	7	0
<i>Prunus serrulata</i> spp.	212	6
<i>Prunus virginiana</i> spp.	22	0
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	130	2

<i>Quercus ×warei</i> spp.	3	0
<i>Quercus frainetto</i> spp.	9	0
<i>Quercus palustris</i> spp.	5	0
<i>Quercus robur</i> spp.	53	24
<i>Quercus rubra</i> spp.	189	87
<i>Quercus xbimundorum</i> spp.	4	0
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	144	13
<i>Robinia xmargaretta</i> spp.	76	0
<i>Sorbus aria</i> spp.	13	2
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	33	21
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	6	8
<i>Tilia cordata</i> ssp.	286	95
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	58	0
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	514	108
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	46	0

Źródło: Opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych z BOŚ

Wszystkie drzewa powyższych gatunków mogą potencjalnie żyć znacznie dłużej niż 40 lat, tym samym należy uznać, iż ich śmierć miała miejsce z powodów innych niż naturalne. Analiza regresji pozwala zauważyć, iż istnieje bardzo wysoka korelacja ($R=0,84$) pomiędzy decyzjami o nasadzeniu nowych gatunków a składem gatunkowym drzew, które obumierają z przyczyn innych niż naturalne. Zależność ta jest istotna statystycznie ($p=5,87832E-11$) co pozwala odrzucić hipotezę zerową o braku zależności tych cech.

4 Dyskusja wyników

Badanie pokazuje, że urzędnicy miejscy w Warszawie przy wyborze gatunków do nasadzeń kierują się ich potencjalną zdolnością do świadczenia usług ekosystemowych, a także składem gatunkowym drzew zamierających już występujących na obszarze miasta. Urzędnicy ci w znacznej mierze postrzegają jednak drzewa miejskie jako realny kapitał, a nie żywe obiekty, oczekując, iż po posadzeniu będą one świadczyły stały strumień korzyści przez pewien okres czasu, zwykle przynajmniej kilkudziesięciu lat. Tym samym zakładają, że wskaźnik przeżywalności drzew i ich kondycji będą bliskie 100 %. Rzeczywistość pokazuje, że są jednak one dla niektórych gatunków drzew znacznie niższe.

Potencjalny strumień korzyści świadczonych przez drzewo danego gatunku przez okres 40 lat można zapisać za pomocą równania:

$$LA_{max1-40}=LA_{max1}+LA_{max2}+LA_{max3}+...LA_{max39}+LA_{max40}$$

Z punktu widzenia dobrobytu społecznego jednak tylko żywe drzewa o zdrowej powierzchni listowia dostarczają korzyści, tak więc bardziej realistyczne równanie opisujące strumień świadczonych usług ekosystemowych przez drzewa można zapisać jako:

$$LA_{real1-40}=LA_{max1}\theta_1\Omega_1+LA_{max2}\theta_2\Omega_2+LA_{max3}\theta_3\Omega_3+...LA_{max39}\theta_{39}\Omega_{39}+LA_{max40}\theta_{40}\Omega_{40},$$

gdzie:

θ_i , to wskaźnik przeżywalności drzew (prawdopodobieństwo dożycia do danego wieku);

Ω_i to wskaźnik kondycji drzew (procent powierzchni LA niezajętych posuszem wśród żywych drzew).

Tabela poniżej (Tabela 8) prezentuje różnice w sumie potencjalnej i rzeczywistej powierzchni listowia drzew różnych gatunków w wieku do 40 roku życia.

Tabela 8. Porównanie sum powierzchni listowia drzew różnych gatunków w wieku do 40 lat

Gatunek	Liczba sadzonych drzew	$LA_{max1-40}$	$LA_{real1-40}$	% potencjalnej powierzchni listowia
<i>Acer campestre</i> spp.	237	1964	1225	62,38
<i>Acer platanoides</i> spp.	589	3279	2027	61,82
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	38	3017	1425	47,26
<i>Acer rubrum</i> spp.	67	2870	1773	61,79
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102	5287	2926	55,32
<i>Betula pendula</i> spp.	27	1196	666	55,65
<i>Betula utilis</i> spp.	8	1211	603	49,84
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183	1611	1192	74,08
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	2	1470	890	60,73
<i>Crataegus x lavalleyi</i> spp.	4	753	435	61,11
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60	762	482	63,30
<i>Crataegus x media</i> spp.	17	895	478	53,55
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196	2820	1599	56,76
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59	2624	1880	71,68
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	35	1015	418	41,20
<i>Malus x moerlandsii</i> spp.	20	1215	907	74,75
<i>Platanus x hispanica</i> spp.	284	3103	1078	34,74
<i>Populus tremula</i> spp.	37	6826	4265	62,47
<i>Prunus calleryana</i> spp.	9	1185	535	45,18

<i>Prunus eminens</i> spp.	7	1185	615	51,93
<i>Prunus serrulata</i> spp.	212	1159	541	46,71
<i>Prunus virginiana</i> spp.	22	1185	556	47,03
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	130	904	679	75,11
<i>Quercus xwarei</i> spp.	3	1543	646	41,86
<i>Quercus frainetto</i> spp.	9	1529	631	41,29
<i>Quercus palustris</i> spp.	5	1529	658	43,19
<i>Quercus robur</i> spp.	53	1644	760	46,21
<i>Quercus rubra</i> spp.	189	2394	810	33,88
<i>Quercus xhimundorum</i> spp.	4	1507	762	50,56
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	144	2327	1572	67,56
<i>Robinia xmarginata</i> spp.	76	2158	1263	58,53
<i>Sorbus aria</i> spp.	13	1149	659	57,42
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	33	1430	736	51,50
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	6	1447	977	67,52
<i>Tilia cordata</i> ssp.	286	3618	2385	65,92
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	514	3580	2292	64,02
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	58	3582	2573	71,83
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	46	3835	1682	43,95

Źródło: Wyliczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Różnice pomiędzy $L_{max1-40}$ i $L_{areal1-40}$ są znaczne. Rzeczywista suma powierzchni listowia stanowi średnio 56% jej potencjalnej sumy (przy braku śmiertelności i posuszu). Występują też znaczne różnice między gatunkami: od niespełna 34% w przypadku *Quercus rubra* spp. (Dąb czerwony) do ponad 75% w przypadku *Pyrus calleryana* spp. (Grusza drobnoowocowa).

Różnice te mają swoje implikacje na sposób zarządzania zielenią miejską w Warszawie. Możliwość osiągnięcia poprawy za pomocą zmiany struktury gatunkowej na przykładzie wybranych gatunków drzew rosnących w Warszawie przedstawiają wykresy poniżej.

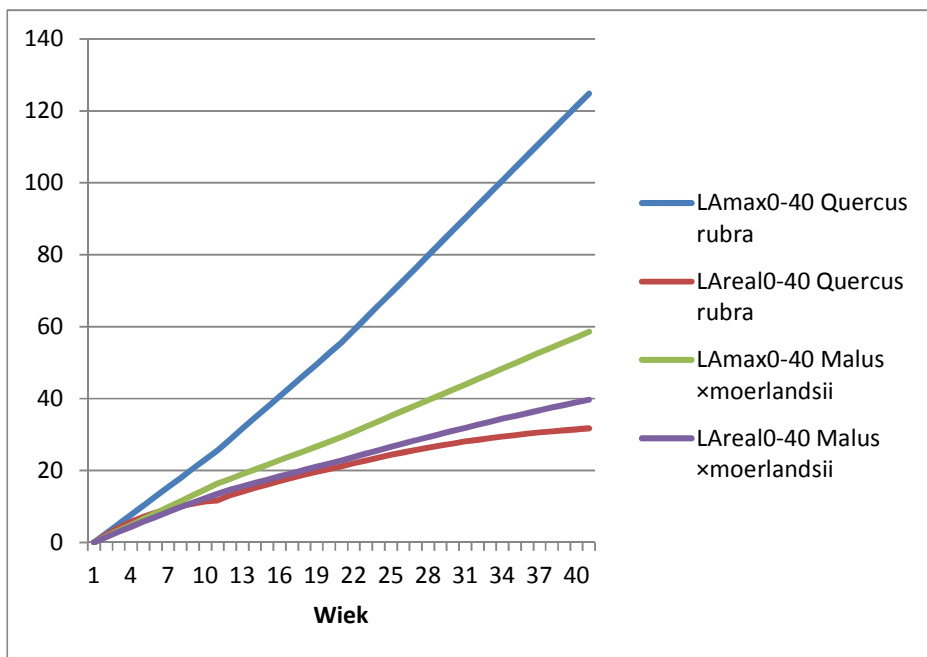
- *Quercus rubra* spp. (Dąb czerwony), *Malus xmoerlandsii* spp. (Jabłoń 'Profusion')

Quercus rubra spp. jest popularnym gatunkiem drzewa przyulicznego w Warszawie, stanowiąc dziewiąty pod względem częstości występowania gatunek (2661 drzew)²⁶. *Malus xmoerandsii* jest zdecydowanie mniej popularny i plasuje się na 58. pozycji (122 drzew). Różnica ta jest również widoczna w nasadzeniach ZOM w latach 2012-2016. W tym czasie posadzono 189 drzew z gatunku *Quercus rubra* i jedynie 20 drzew z gatunku *Malus xmoerandsii*. Różnicę pomiędzy

²⁶ Drogi krajowe, wojewódzkie i powiatowe

potencjalną ($L_{Amax0-40}$) a rzeczywistą ($L_{Areal0-40}$) sumą listowia obu gatunków w wieku do 40 lat przedstawia wykres poniżej (Wykres 4).

Wykres 4. Porównanie sum L_{Amax} i L_{Areal} dwóch gatunków (*Quercus rubra*, *Malus xmoerlandsii*) w wieku do 40 lat



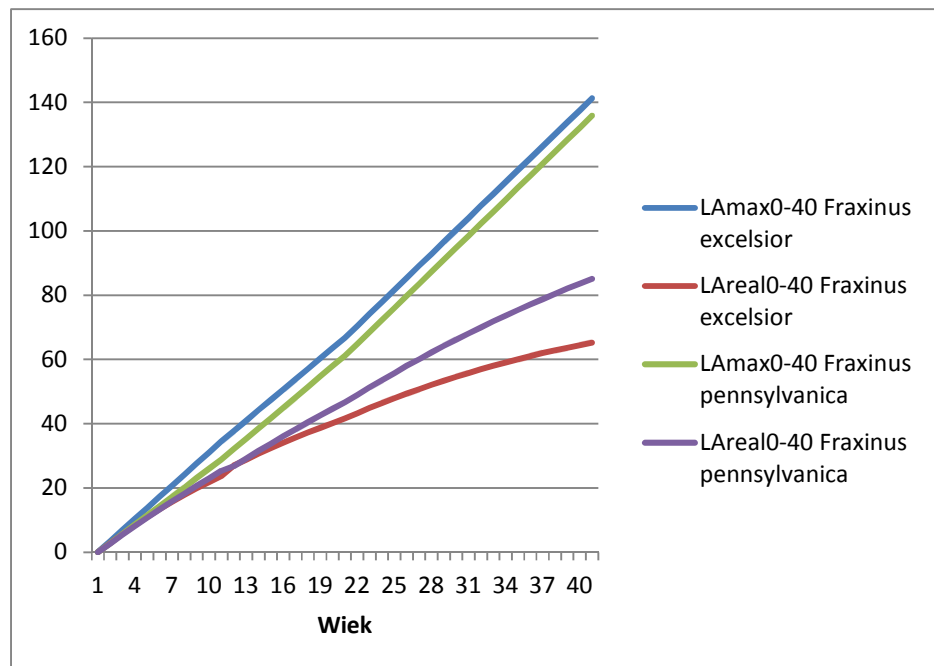
Źródło: Wyliczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Tak duża dysproporcja wydaje się uzasadniona, jeżeli wziąć pod uwagę potencjalną sumę powierzchni listowia drzew obu gatunków do 40 roku życia. Dla *Quercus rubra* wartość ta wynosi ponad 2394 m², podczas gdy dla *Malus xmorlandsii* niecałe 1215 m². Jeżeli jednak uwzględnić wskaźniki śmiertelności i posuszu dla obu gatunków, okazuje się, że *Malus xmorlandsii* posiada większą realną sumę powierzchni listowia (907 m²) niż *Quercus rubra* (810 m²).

- *Fraxinus excelsior* spp. (Jesion wyniosły), *Fraxinus pennsylvanica* spp. (Jesion pensylwański)

Fraxinus excelsior oraz *Fraxinus pennsylvanica* są to gatunki pokrewne. Oba gatunki są bardzo często występujące na obszarze całej Polski. *Fraxinus excelsior* zwykle jest nieco większy niż *Fraxinus pennsylvanica*. Różnią się też częstością występowania przy ulicach Warszawy. *Fraxinus excelsior* jest czwartym pod względem częstości występowania gatunkiem drzew przyulicznych w Warszawie (3776). *Fraxinus pennsylvanica* zajmuje pozycję czternastą (1138 drzewa). Porównanie sum potencjalnej i rzeczywistej powierzchni listowia ($L_{Amax0-40}$ i $L_{Areal0-40}$) tych dwóch gatunków w wieku do 40 lat prezentuje Wykres 5.

Wykres 5. Porównanie sum LA_{max} i LA_{real} dwóch gatunków (*Fraxinus excelsior*, *Fraxinus pennsylvanica*) w wieku do 40 lat



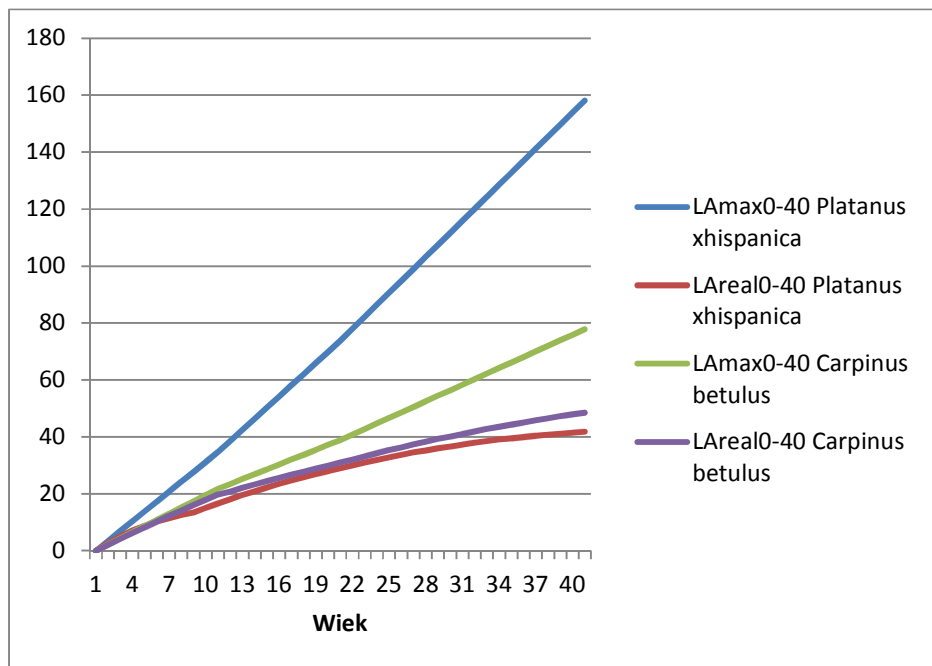
Źródło: Wyliczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Porównując potencjalną zdolność do świadczenia usług ekosystemowych obu gatunków, wyrażoną w potencjalnej sumie listowia, *Fraxinus excelsior* wypada w tym zestawieniu lepiej (2820 m²) niż *Fraxinus pennsylvanica* (2624 m²). Sytuacja ta jednak zmienia się po uwzględnieniu wskaźników śmiertelności i posuszu obu gatunków na korzyść *Fraxinus pennsylvanica*, którego rzeczywista powierzchnia listowia wynosi wtedy 1880 m², podczas gdy rzeczywista powierzchnia listowia *Fraxinus pennsylvanica* wynosi 1599 m².

- *Platanus xhispanica* spp. (Platan klonolistny), *Carpinus betulus* spp. (Grab pospolity)

Platanus xhispanica jest to stosunkowo duży gatunek drzewa dość licznie występujący przy drogach Warszawy (798). *Carpinus betulus* jest z kolei gatunkiem średnim, występującym o ponad połowę rzadziej (346). Porównania sum potencjalnej i rzeczywistej powierzchni listowia (LA_{max}0-40 i LA_{real}0-40) tych dwóch gatunków w wieku do 40 lat dokonano na Wykresie 6.

Wykres 6. Porównanie sum L_{Amax} i L_{Areal} dwóch gatunków (*Platanus xhispanica*, *Carpinus betulus*) w wieku do 40 lat



Źródło: Wylczenia własne na podstawie modelowania za pomocą narzędzia i-Tree Eco

Różnica w ich rozmiarze odzwierciedla się wyraźnie w potencjalnej zdolności do świadczenia usług ekosystemowych, gdzie skumulowana powierzchnia listowia *Platanus xhispanica* wynosi o blisko połowę więcej (3103 m^2) niż w przypadku *Carpinus betulus* (1611 m^2). Rzeczywista zdolność do świadczenia tych usług jest jednak zupełnie inna. *Carpinus betulus* posiada skumulowaną powierzchnię listowia o rozmiarze 1192 m^2 , podczas gdy *Platanus xhispanica* 1078 m^2 .

Zaprezentowane wyniki można również przedstawić bardziej ogólnie na przykładzie analizy marginalnej dwóch gatunków. Dla uproszczenia notacji, wycenione potencjalne korzyści świadczone przez drzewo o danej powierzchni listowia przez okres 40 lat ($L_{Amax1-40}$) oznaczmy jako δ , natomiast wycenione realne korzyści świadczone przez to drzewo ($L_{Areal1-40}$) oznaczmy jako b .

Założmy, że są dwa gatunki drzew które świadczą usługi ekosystemowe o potencjalnej wartości kolejno b_1 i b_2 gdzie $b_1 < b_2$. Tym samym całkowita wartość korzyści świadczonych przez te drzewa to $\beta = b_1 n_1 + b_2 n_2$, gdzie n_1 i n_2 , to ilości drzew pierwszego i drugiego gatunku. Jeżeli jako

x oznaczmy ułamek drzew drugiego gatunku ($x=n_2/N$), gdzie N to całkowita liczba drzew, to wyrażenie to będzie można przedstawić jako:

$$\beta = b_1(1-x)N + b_2xN,$$

i

$$\partial\beta/\partial x = N(b_2 - b_1) > 0.$$

Wyrażenie opisujące realną wartość, jaką te gatunki świadczą można przedstawić następująco:

$$B = b_1(1-x)N\theta_1 \Omega_1 + b_2xN\theta_2\Omega_2,$$

i

$$\partial B/\partial x = N(\theta_2\Omega_2b_2 - \theta_1\Omega_1b_1).$$

Poza strefą korzyści świadczonych przez drzewa, istotną stroną równania są również koszty zakupu i posadzenia drzewa. Zbadano, czy koszt ten zależy od potencjalnego strumienia korzyści świadczonego przez drzewo (Tabela 9).

Tabela 9. Koszt zakupu i posadzenia drzewa a jego powierzchnia listowia

Gatunek	Liczba sadzonych drzew	LAm _{ax0-40}	Średnia cena
<i>Acer campestre</i> spp.	237	1964	505
<i>Acer platanoides</i> spp.	589	3279	520
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	38	3017	549
<i>Acer rubrum</i> spp.	67	2870	559
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102	5287	666
<i>Betula pendula</i> spp.	27	1196	492
<i>Betula utilis</i> spp.	8	1211	496
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183	1611	517
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	2	1470	544
<i>Crataegus ×lavalleyi</i> spp.	4	753	518
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60	762	559
<i>Crataegus ×media</i> spp.	17	895	519
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196	2820	502
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59	2624	514
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	35	1015	616
<i>Malus ×moerlandsii</i> spp.	20	1215	554
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	284	3103	489
<i>Populus tremula</i> spp.	37	6826	657
<i>Prunus calleriana</i> spp.	9	1185	466
<i>Prunus eminens</i> spp.	7	1185	517
<i>Prunus serrulata</i> spp.	212	1159	500
<i>Prunus virginiana</i> spp.	22	1185	537

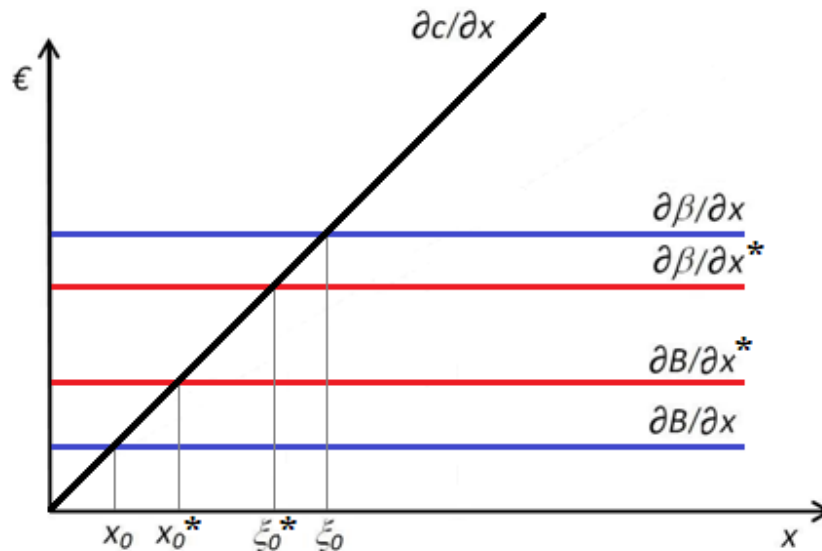
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	130	904	528
<i>Quercus xwarei</i> spp.	3	1543	566
<i>Quercus frainetto</i> spp.	9	1529	869
<i>Quercus palustris</i> spp.	5	1529	579
<i>Quercus robur</i> spp.	53	1644	559
<i>Quercus rubra</i> spp.	189	2394	591
<i>Quercus xbimundorum</i> spp.	4	1507	495
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	144	2327	483
<i>Robinia xmargaretta</i> spp.	76	2158	739
<i>Sorbus aria</i> spp.	13	1149	446
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	33	1430	578
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	6	1447	486
<i>Tilia cordata</i> ssp.	286	3618	488
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	514	3580	539
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	58	3582	500
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	46	3835	645

Źródło: Opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych z BOŚ oraz (Nowocin, K., 2017. ZOM, Warsaw).

Analiza regresji wykazała, że istnieje słaba dodatnia zależność pomiędzy ceną drzewa a jego potencjalną sumą listowia w wieku do 40 lat ($R=25$). Niemniej istnieje 13%-owe prawdopodobieństwo na uzyskanie takich wyników jakie obserwujemy lub nawet wyników wskazujących na silniejszy związek przy założeniu, że hipoteza zerowa jest prawdziwa, co nie pozwala na jej odrzucenie ($p=0,13$). Tym samym brak podstaw aby przyjąć, iż cena jest uzależniona od potencjału drzewa do świadczenia usług ekosystemowych.

Zaprezentowany przykład analizy marginalnej dwóch gatunków można przedstawić graficznie (Wykres 7).

Wykres 7. Interpretacja graficzna analizy marginalnej dwóch gatunków drzew



Źródło: Opracowanie własne

Na powyższym rysunku można łatwo zauważyć, że proporcja pomiędzy drzewami dwóch gatunków (razem stanowią 100%) jest inna, jeżeli uwzględnić współczynniki śmiertelności i posuszu (x_0 i x_{0*}), niż gdyby tych współczynników nie uwzględniać (ξ_0 i ξ_{0*})

Główna konkluzja z badania jest taka, że skład gatunkowy preferowany przez kierownictwo ZOM (ξ_0 i ξ_{0*}) jest inne niż to preferowane przez BOŚ - Prezydenta Miasta st. Warszawy (x_0 i x_{0*}). Skutkiem tego, że kierownictwo ZOM nie bierze w wystarczającym stopniu pod uwagę przy nasadzeniach wskaźników śmiertelności i posuszu drzew jest nadreprezentacja drzew dużych, o dużym potencjalne do świadczenia usług ekosystemowych, ale mniejszym od innych gatunków rzeczywistym strumieniu świadczonych usług ekosystemowych.

BIBLIOGRAFIA

- Borkowski J i in, 2016, Standardy kształtowania zieleni Warszawy, Opracowanie wykonane przez Polskie Towarzystwo Dendrologiczne dla Mista Stołecznego Warszawy.
- Borowski, J., Latocha, P., 2006, Dobór drzew i krzewów do warunków przyulicznych Warszawy i miast centralnej Polski. Rocznik dendrologiczny Vol. 54 – 2006 • 83–93

- Bugała W., Chylarecki H., Bojarczuk T. 1984. Dobór drzew i krzewów do obsadzania ulic, placów i w miastach z uwzględnieniem kryteriów rejonizacji. *Arboretum Kórnickie* 29: 35-62.
- Dmuchowski W., Bandurek M., 2001., Stan zieleni przyulicznej w Warszawie na podstawie wieloletnich obserwacji i doświadczeń Ogródu Botanicznego - CZRB PAN. W: *Zieleń Warszawy problemy i nadzieje*. Mat. konf. Warszawa-Powsin, Ogród Botaniczny PAN (Dmuchowski W., Niekrasz K., red.), Warszawa, 4.10.2001: 19-31.
- Guzy, M. R., C. L. Smith, J. P. Bolte, D. W. Hulse and S. V. Gregory, 2008. "Policy research using agent-based modeling to assess future impacts of urban expansion into farmlands and forests", *Ecology and Society* 13(1): 37 [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art37/>
- Hotte, N., C. Mahony, and H. Nelson, 2016. "The principal-agent problem and climate change adaptation on public lands", *Global Environmental Change* 36: 163–174
- Kronenberg, J., 2015. "Why not to green a city? Institutional barriers to preserving urban ecosystem services", *Ecosystem Services* 12: 218–227
- Mas-Colell, A., M. D. Whinston, and J. R. Green, 1995. *Microeconomic Theory*, Oxford University Press, New York
- McPherson, E.G., 2014. Monitoring million trees LA: tree performance during the early years and future benefits. *Arboricult. Urban For.* 40, 285–300
- Molenda T., 1980, *Mała encyklopedia leśna*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe (PWN).
- Pawlaczyk P, 2012, *Natura 2000 i inne wymagania europejskiej ochrony przyrody - niezbędnik leśnika*. Świebódzin: Wydawnictwo Klubu Przyrodników.
- Siewniak M., Czekalski M., 2001, *Historia rozwoju miejskich terenów zieleni i zmian ich funkcji*, Międzynarodowe Towarzystwo Uprawy i Ochrony Drzew, Kluczbork.
- Szczepanowska H. B., 2001, *Drzewa w mieście*. Hortpress, Warszawa
- Szkop, Z. 2017. *Wartość ekonomiczna usług ekosystemów świadczonych przez drzewa miejskie*. Working paper

Aneks I

Gatunek	Liczba drzew
<i>Acer platanoides</i> spp.	589
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	514
<i>Tilia cordata</i> ssp.	286
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	284
<i>Acer campestre</i> spp.	237
<i>Prunus serrulata</i> spp.	212
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	196
<i>Quercus rubra</i> spp.	189
<i>Carpinus betulus</i> spp.	183
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	144
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	130
<i>Aesculus carnea</i> spp.	102
<i>Robinia xmargaretta</i> spp.	76
<i>Acer rubrum</i> spp.	67
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	60
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	59
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	58
<i>Quercus robur</i> spp.	53
<i>Ulmus hollandica</i> spp.	46
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	38
<i>Populus tremula</i> spp.	37
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	35
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	33
<i>Betula pendula</i> spp.	27
<i>Prunus virginiana</i> spp.	22
<i>Malus xmoerlandsii</i> spp.	20
<i>Crataegus xmedia</i> spp.	17
<i>Sorbus aria</i> spp.	13
<i>Prunus calleriana</i> spp.	9
<i>Quercus frainetto</i> spp.	9
<i>Betula utilis</i> spp.	8
<i>Prunus eminens</i> spp.	7
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	6
<i>Quercus palustris</i> spp.	5
<i>Crataegus xlavallei</i> spp.	4
<i>Quercus xbimundorum</i> spp.	4
<i>Quercus xwarei</i> spp.	3
<i>Catalpa bignonioides</i> spp.	2
SUMA	3784

Aneks II

Drzewa rosnące przy drogach I, II i III rzędu		
Gatunek	Liczba drzew	%
<i>Tilia cordata</i> spp.	12511	16,392
<i>Acer platanoides</i> spp.	9997	13,099
<i>Acer negundo</i> spp.	5666	7,424
<i>Fraxinus excelsior</i> spp.	3776	4,948
<i>Acer saccharinum</i> spp.	3396	4,451
<i>Tilia platyphyllos</i> spp.	3203	4,197
<i>Populus nigra</i> spp.	3145	4,122
<i>Quercus robur</i> spp.	3145	4,122
<i>Quercus rubra</i> spp.	2661	3,488
<i>Acer pseudoplatanus</i> spp.	2613	3,424
<i>Robinia pseudoacacia</i> spp.	2470	3,237
<i>Betula pendula</i> spp.	2461	3,225
<i>Aesculus hippocastanum</i> spp.	1833	2,402
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> spp.	1138	1,492
<i>Sorbus intermedia</i> spp.	1109	1,454
<i>Populus simonii</i> spp.	1089	1,427
<i>Sorbus aucuparia</i> spp.	1001	1,312
<i>Pinus sylvestris</i> spp.	954	1,251
<i>Platanus xhispanica</i> spp.	798	1,046
<i>Prunus domestica</i> spp.	660	0,866
<i>Prunus cerasifera</i> spp.	652	0,855
<i>Populus alba</i> spp.	646	0,848
<i>Acer campestre</i> spp.	506	0,664
<i>Ulmus laevis</i> spp.	501	0,657
<i>Acer tataricum</i> spp.	495	0,649
<i>Crataegus monogyna</i> spp.	490	0,643
<i>Pyrus calleryana</i> spp.	489	0,641
<i>Rhus typhina</i> spp.	454	0,596
<i>Prunus cerasus</i> spp.	401	0,526
<i>Tilia xeuropaea</i> spp.	363	0,476
<i>Carpinus betulus</i> spp.	346	0,453
<i>Populus xcanescens</i> spp.	333	0,437
<i>Populus tremula</i> spp.	331	0,434
<i>Tilia euchlora</i> spp.	327	0,429
<i>Prunus avium</i> spp.	290	0,381
<i>Picea abies</i> spp.	288	0,378
<i>Juglans regia</i> spp.	266	0,349
<i>Populus maximowiczii</i> spp.	243	0,318

<i>Picea pungens</i> spp.	234	0,308
<i>Ginkgo biloba</i> spp.	233	0,306
<i>Pyrus pyrastrer</i> spp.	224	0,294
<i>Salix alba</i> spp.	212	0,279
<i>Alnus glutinosa</i> spp.	208	0,273
<i>Malus sylvestris</i> spp.	208	0,273
<i>Salix fragilis</i> spp.	178	0,234
<i>Sambucus nigra</i> spp.	177	0,232
<i>Populus xberolinensis</i> spp.	175	0,230
<i>Tilia tomentosa</i> spp.	171	0,224
<i>Elaeagnus angustifolia</i> spp.	159	0,209
<i>Sorbus aria</i> spp.	152	0,200
<i>Populus x canadensis</i> spp.	150	0,197
<i>Padus avium</i> spp.	146	0,193
<i>Thuja occidentalis</i> spp.	146	0,193
<i>Larix decidua</i> spp.	142	0,187
<i>Sorbus torminalis</i> spp.	141	0,185
<i>Quercus petraea</i> spp.	140	0,183
<i>Fraxinus ornus</i> spp.	133	0,174
<i>Malus xmoerlandsii</i> spp.	122	0,161
<i>Pinus nigra</i> spp.	119	0,156
<i>Malus domestica</i> spp.	118	0,155
<i>Prunus serrulata</i> spp.	116	0,153
<i>Aesculus xcarnea</i> spp.	107	0,141
<i>Corylus colurna</i> spp.	105	0,138
<i>Crataegus laevigata</i> spp.	105	0,138
<i>Prunus serotina</i> spp.	79	0,105
<i>Caragana arborescens</i> spp.	74	0,097
<i>Fagus sylvatica</i> spp.	74	0,097
<i>Ulmus minor</i> spp.	74	0,097
<i>Abies alba</i> spp.	55	0,073
<i>Malus xpurpurea</i> spp.	52	0,068
<i>Acer rubrum</i> spp.	49	0,065
<i>Morus alba</i> spp.	46	0,061
<i>Prunus spinosa</i> spp.	42	0,056
<i>Syringa vulgaris</i> spp.	41	0,055
<i>Salix xsepulcralis</i> spp.	39	0,052
<i>Ulmus glabra</i> spp.	38	0,050
<i>Robinia hispida</i> spp.	35	0,047
<i>Salix caprea</i> spp.	31	0,041
<i>Pinus strobus</i> spp.	28	0,038
<i>Laburnum anagyroides</i> spp.	25	0,033

<i>Hippophae rhamnoides spp.</i>	23	0,030
<i>Prunus padus spp.</i>	23	0,030
<i>Catalpa bignonioides spp.</i>	19	0,026
<i>Taxus baccata spp.</i>	19	0,026
<i>Picea omorika spp.</i>	16	0,021
<i>Salix babylonica spp.</i>	16	0,021
<i>Pinus rigida spp.</i>	15	0,020
<i>Betula papyrifera spp.</i>	13	0,018
<i>Abies concolor spp.</i>	12	0,017
<i>Prunus armeniaca spp.</i>	12	0,017
<i>Acer pensylvanicum spp.</i>	10	0,014
<i>Gleditsia triacanthos spp.</i>	10	0,014
<i>Abies grandis spp.</i>	9	0,012
<i>Acer saccharum spp.</i>	9	0,012
<i>Juglans nigra spp.</i>	9	0,012
<i>Corylus avellana spp.</i>	8	0,011
<i>Abies koreana spp.</i>	6	0,009
<i>Juniperus communis spp.</i>	6	0,009
<i>Crataegus macracantha spp.</i>	5	0,008
<i>Malus floribunda spp.</i>	5	0,008
<i>Prunus xeminens spp.</i>	5	0,008
<i>Picea glauca spp.</i>	4	0,006
<i>Picea orientalis spp.</i>	4	0,006
<i>Prunus triloba spp.</i>	4	0,006
<i>Pseudotsuga menziesii spp.</i>	4	0,006
<i>Crataegus punctata spp.</i>	3	0,005
<i>Juniperus virginiana spp.</i>	3	0,005

<i>Prunus persica spp.</i>	3	0,005
<i>Ptelea trifoliata spp.</i>	3	0,005
<i>Ailanthus altissima spp.</i>	2	0,003
<i>Cercidiphyllum japonicum spp.</i>	2	0,003
<i>Chamaecyparis pisifera spp.</i>	2	0,003
<i>Larix xmarschlinsii spp.</i>	2	0,003
<i>Liriodendron tulipifera spp.</i>	2	0,003
<i>Malus xscheideckeri spp.</i>	2	0,003
<i>Pinus mugo spp.</i>	2	0,003
<i>Pinus ponderosa spp.</i>	2	0,003
<i>Pterocarya fraxinifolia spp.</i>	2	0,003
<i>Rhamnus cathartica spp.</i>	2	0,003
<i>Ulmus pumila spp.</i>	2	0,003
<i>Abies nordmanniana spp.</i>	1	0,002
<i>Alnus incana spp.</i>	1	0,002
<i>Catalpa speciosa spp.</i>	1	0,002
<i>Celtis spp.</i>	1	0,002
<i>Chamaecyparis nootkatensis spp.</i>	1	0,002
<i>Fraxinus angustifolia spp.</i>	1	0,002
<i>Juglans cinerea spp.</i>	1	0,002
<i>Larix kaempferi spp.</i>	1	0,002
<i>Malus royalty spp.</i>	1	0,002
<i>Prunus mahaleb spp.</i>	1	0,002
<i>Sambucus racemosa spp.</i>	1	0,002
<i>Sophora japonica spp.</i>	1	0,002
<i>Tilia americana spp.</i>	1	0,002
Suma	76263	100